

## 脉冲核磁共振成像实验

08340190092 张文娟 指导老师：俞熹

**摘要** 本文主要讨论了台式核磁共振实验仪在成像过程中需要调节的参数及其对图像质量的影响及其改善方式，并从成像过程、编码方式等方面解释参数的意义。

**关键词** 核磁共振 成像 参数调节 自旋回波序列

**引言** 核磁共振是现代对于物质结构内部的探测的重要技术手段，可以用于两个方面：波谱学用来测量高分子化学结构和分子结构，成像学实现使物体内部的成像。自从 1945 年 Bloch 和 Purcell 发现核磁共振现象，Bloch 因此推出求解核磁共振定量计算方程——Bloch 方程以来，已有很多科学家在核磁共振成像及其应用方面做出杰出贡献，其技术研究深度和广度不断增加，应用范围也在日益扩大。本文主要对各项同性液体成像的射频脉冲的调节及其它参数对成像质量的影响作了讨论。

### 实验原理

#### 1. 核磁共振基本原理

核磁共振是利用原子核有自旋，在外磁场作用下发生能级分裂，在垂直于主磁场方向上加一个射频磁场使得原子核可以吸收射频能量在分裂的能级之间发生跃迁，当所加射频场的频率满足一定条件，使吸收达到最大就是达到了核磁共振状态。质量数与质子数均为偶数的核不存在核磁矩，不能用于核磁共振实验。质量数与质子数不全为偶数的核都是具有和自旋量子数不为零的核磁矩，但只有核自旋量子数为  $1/2$  的核的 NMR 信号有规则易于观测，可以用于核磁共振实验，常用的核有  $^1H$ ， $^{13}C$ ， $^{15}N$ ， $^{19}F$ ， $^{31}P$ ，不同的核共振中心频率不同。

我们用宏观极化矢量来描述由大量自旋核组成的系统的核自旋。宏观极化矢量在主磁场作用下做进动，进动频率由拉莫尔公式决定： $\omega_0 = \gamma B_0$ ，其中  $\gamma$  是旋磁比，不同的核旋磁

比不同。在垂直于主磁场方向上加一频率与拉莫尔频率相同的射频电磁场  $B_1$ ，宏观极化矢量受到射频脉冲的作用偏离 Z 轴一个角度  $\theta = \gamma B_1 \tau$ ，改变脉宽  $\tau$  可以获得不同偏转角度，常用脉冲有  $90^\circ$  和  $180^\circ$  脉冲。射频场频率与拉莫尔频率相同就是核磁共振条件。

## 2. 弛豫时间与共振信号

主磁场中的自旋核子群系统受到射频激励后，宏观磁化矢量失去平衡，偏离 Z 方向，使得纵向磁化矢量减小，同时出现横向磁化矢量。射频停止后，自旋核子群系统要从非平衡态恢复到平衡态，包括纵向磁化矢量的恢复和横向磁化矢量的消失两个过程，称为  $T_1$  弛豫和  $T_2$  弛豫。纵向弛豫本质是自旋核释放激励过程中吸收的射频能量回到基态的过程，时间长短与质子所处分子大小有关。横向弛豫本质是激励过程使质子进动相位的一致性逐渐散相，与质子所处的周围分子结构均匀性有关，分子结构越均匀，横向弛豫越长。

弛豫过程是宏观磁化的一个呈螺旋线的运动过程，在正在发生弛豫的区域外环绕一封闭线圈，线圈将感生出微弱电动势，形成核磁共振信号，如图 1。只有横向磁化矢量的运动受线圈切割，可得感生电动势  $V(t) \propto M_0 \sin \theta \cos(\omega_0 t) e^{-t/T_2^*}$ ，表明核磁共振信号是一个自由振荡衰减信号，称 FID ( free induction decay ) 信号。

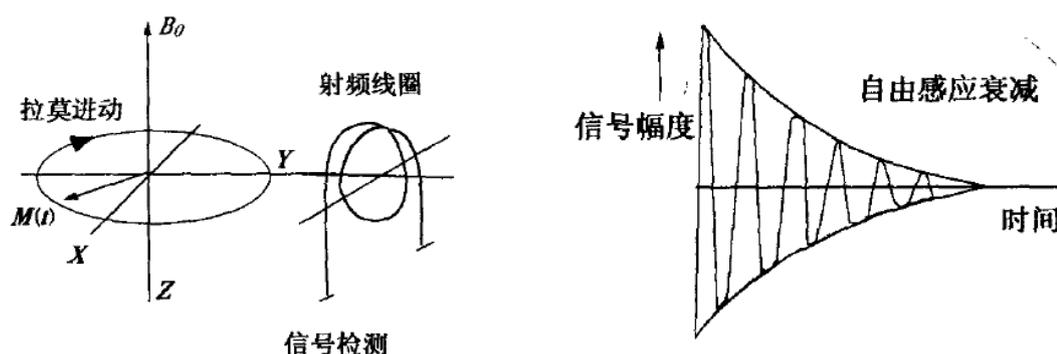
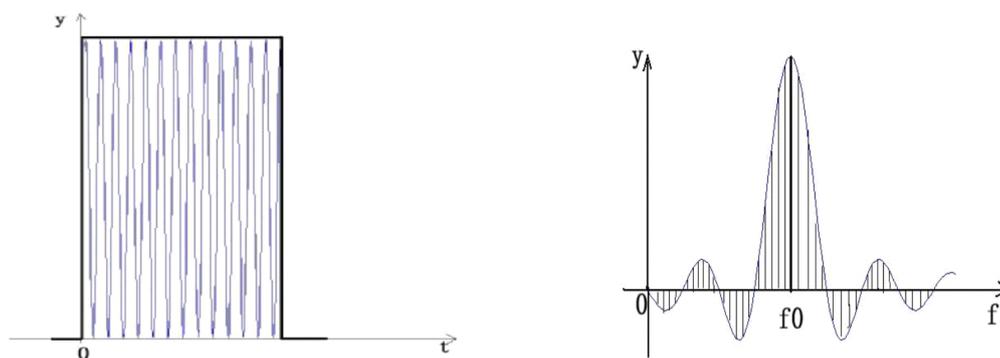


图 1 FID 信号的检测及其衰减规律

## 3. 软脉冲与硬脉冲

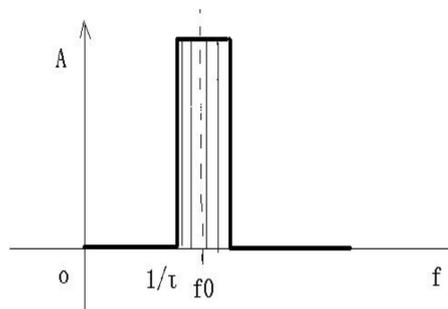
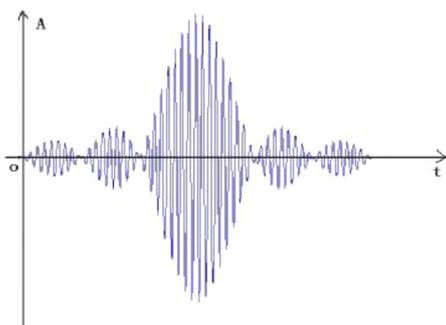
硬脉冲一般脉宽小，强度高，具有较宽的频带，能激励较宽频率范围的信号，用作非选

选择性激励，在波谱学中常用，波形为强而窄的矩形。软脉冲一般脉宽较长，强度小，具有较窄的频带，只能激励较窄频率范围的信号，用作选择性激励，核磁共振成像中常用。脉冲参数偏转角的参数除了  $P1$ ， $P2$  ( $90^\circ$  和  $180^\circ$  射频施加时间)，软脉冲比硬脉冲还多一个参数就是  $90^\circ$  和  $180^\circ$  射频的脉冲幅度，用占硬脉冲幅度的百分比  $RFamp1$ ， $RFamp2$  标识。



硬脉冲 (时间域)

硬脉冲 (频域)



5 个耳瓣 sinc 波形的射频软脉冲 (时间域)

对应的方波频域

图 2 硬脉冲与软脉冲时间域和频域的图

**实验设备与器材：** NMI20 台式核磁共振教学成像仪；约 10mm 高芝麻油试管样品，约 2g 的芝麻样品，管径为 10mm 的试管。

### 原理性实验

#### 1. 硬脉冲 FID 信号确定拉莫尔频率

实验中用液体中的质子氢，液体有个向同性的性质，弛豫时间较长。用芝麻油样品确定油中氢质子拉莫尔频率。调节核磁共振中心频率，即射频场的频率，寻找 FID 信号。在观

察到 FID 信号（偏共振）的基础上，并在合适的采样时间里做傅里叶变换，将信号峰值对应的频率值设为下次采集数据的中心频率，重复多次，直到信号达到共振状态——无振荡的衰减。对于不同仪器由于主磁场  $B_0$  不同，拉莫尔频率也就不同。本次实验中氢质子中心频率为 22.283382MHz。成像实验是在系统处在共振状态中进行的，所以确定拉莫尔中心频率是成像实验的第一步。FID 信号实际是横向磁化矢量受线圈切割而来的，则有  $90^\circ$  时 FID 信号幅值最大， $180^\circ$  FID 信号幅值最小，根据公式  $\theta = \gamma B_1 \tau$ ，可以确定  $90^\circ$  和  $180^\circ$  脉冲的施加时间分别为  $47.5 \mu s$  和  $94 \mu s$ 。

## 2.用软脉冲回波确定软脉冲射频脉冲

回波信号是宏观磁化矢量经历弛豫散相后，在  $180^\circ$  脉冲作用下反向重聚，再经历弛豫散相，信号幅值先指数上升再指数下降。对于软脉冲回波，回波序列是  $90^\circ - 180^\circ$ ，调整射频反转角度是通过参数 RFamp1 和 RFamp2。在共振状态下，修改参数 RFamp1 和 RFamp2 使得信号幅值达到最大，此时 RFamp1=33.5%，RFamp2=67%即分别为软脉冲回波  $90^\circ$ ， $180^\circ$  射频脉冲对应脉冲幅度。

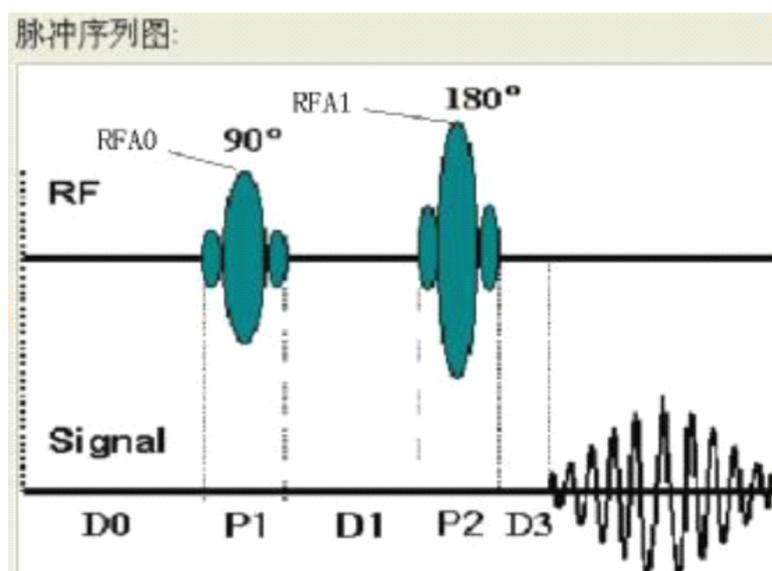


图3 软脉冲回波脉冲序列图

## 成像实验

## 1.自旋回波序列成像

用 $90^\circ$ 射频脉冲激励样品,宏观磁化矢量迅速倒向XY平面,然后施加一个选层梯度 $G_z$ 以选择并激发某一特定层面,接下来是一个 $180^\circ$ 脉冲,改变XY平面内质子进动方向,使失相质子重新相位重聚,产生自旋回波信号。在相位编码梯度和频率编码梯度作用下数据采集,实现对每个体素的最终定位,每个体素在两个方向上具有不同的频率和相位。

参数: D0——重复时间 $T_R$ ; D1——相位编码时间; D3——死时间,代表射频脉冲结束到开始采样的延迟; D4和D5——回波时间, $180^\circ$ 脉冲结束后产生回波峰值的时间; SP1和SP2—— $90^\circ$ 和 $180^\circ$ 脉冲宽度; RFamp1, RFamp2—— $90^\circ$ ,  $180^\circ$ 脉冲的脉冲幅度,在软脉冲回波实验中已经得到了; D2——相平衡梯度施加时间; 采样参数 TD, SW, DFW; 层选梯度 GzAmp, 频率编码梯度 GxAmp, 相位编码梯度 GyAmp。

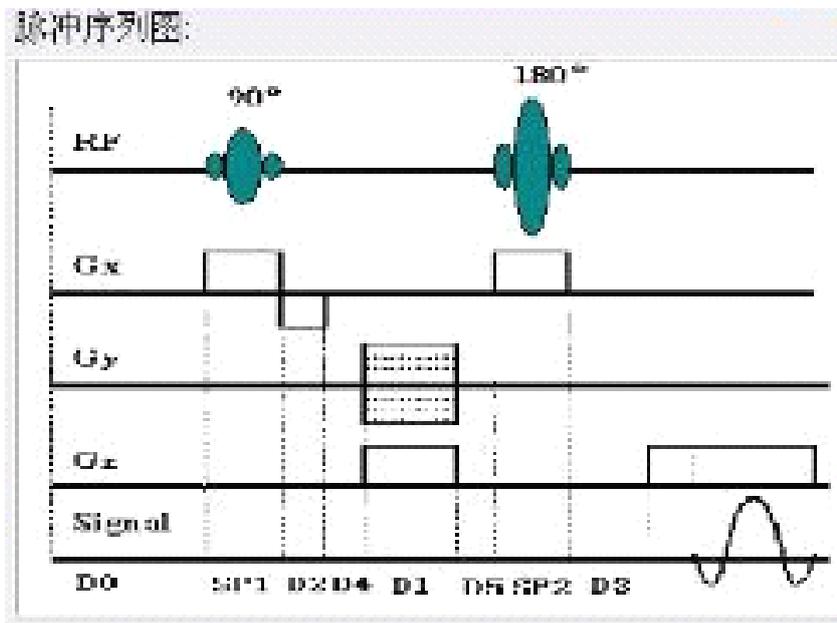


图4 自旋回波序列成像脉冲序列

## 2.讨论参数 SW, GzAmp, GxAmp, GyAmp, D1 对成像的影响

基本采样参数: TD=512, D1=1200  $\mu$ s, SW=100KHz

- i 固定 GzAmp=48%, GyAmp=80%, 改变 GxAmp 为 10%, 25%, 50%

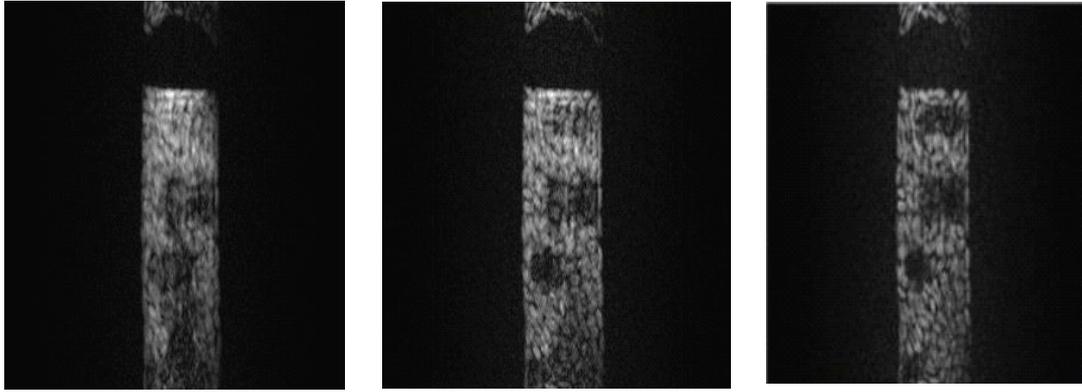


图5 GxAmp=10%,25%,50%芝麻矢状面成像

由图可以观察出，此时 GxAmp 是起选层梯度的作用，据层厚  $\Delta Z$  与选层梯度  $G_z$  的关系式  $\Delta Z = \Delta f / (\gamma G_z)$  知其反相关（将式中的 Z 换成 X），随着 GxAmp 的增大，层厚越薄，层厚决定能够发生核磁共振的组织的进动频率范围，层厚越薄，发生共振的组织越少，分辨率越高，但亮度会下降，信号越弱。

ii 固定 GzAmp=48%，GyAmp=80%，GxAmp=25%，改变 D1=2400  $\mu s$

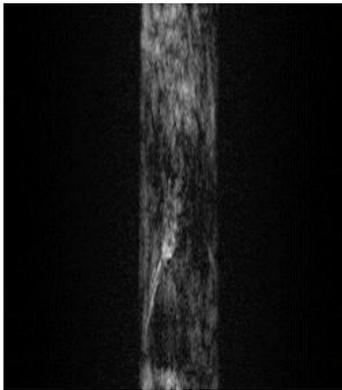


图6 D1 增加一倍芝麻矢面图

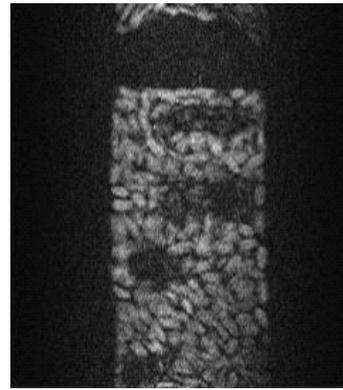


图7 SW 减小一倍芝麻矢面图 (GxAmp=50%)

由图可知，样品在图像中的长度与 D1 时间成正比，由于宽度没有改变，在图像中就是相当于被纵向拉长；样品在图像中的宽度与采样谱宽 SW 成反比，而采样谱宽 SW 减小会使得频率差别  $\Delta\omega_x$  减小，据视野  $(FOV)_x = \Delta\omega_x / \gamma G_x$  (X 是指频率编码方向，而非所调参数 GxAmp)，视野减小，图像在视野中变大，不过也是只有横向的加宽。

iii 芝麻横断面成像参数影响方式

注：下示图的图题格式 GxAmp(%)-GyAmp(%)-GzAmp(%) + 其他参量改变值 (若有)

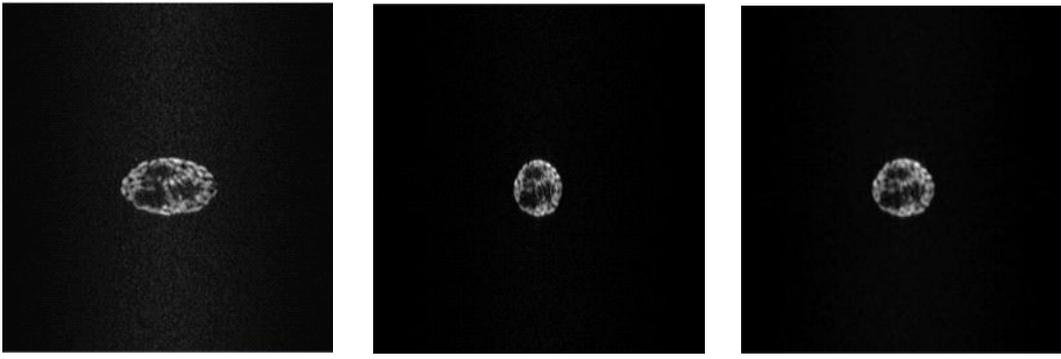


图 8 Gx25%-Gy80%-Gz60% 图 9 Gx25%-Gy40%-Gz30%图 10 Gx25%-Gy40%-Gz40%

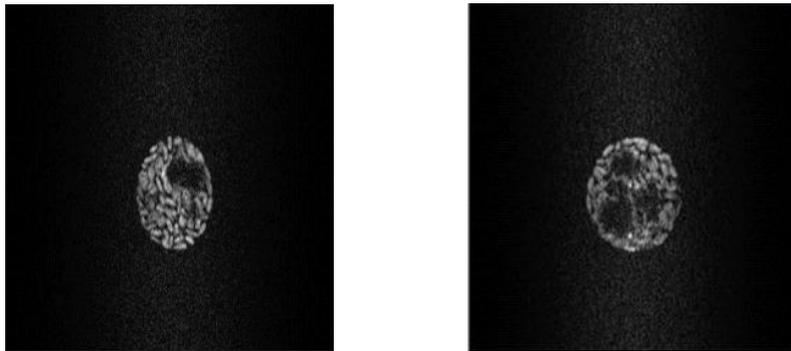


图 11 Gx50%-Gy80%-Gz48% 图 12 Gx50%-Gy80%-Gz60%

由上面五张图可以观察出，成样品横断面图时，GyAmp 是选层梯度，决定层厚，GxAmp 是相位编码梯度，决定纵向上样品占图像的大小，GzAmp 是频率编码梯度，决定横向上样品占图像的大小。在此时其他实验参数，GxAmp 与 GzAmp 之比为 5:6 时，基本保证图像的线性度，图像的线性度即  $(FOV)_X = (FOV)_Y$ ，X、Y 只表示图像二维平面的两个正交方向，也即视野是平直空间。据  $(FOV)_X = \Delta\omega_X / \gamma G_X$  和  $(FOV)_Y = NE / (2Dl \times \gamma G_Y)$ ，可以调节式中的参数来获得与真实物体成比例的图像。最关键的步骤还是确定参数中 GyAmp，GxAmp，GzAmp 哪个是决定层厚的选层梯度，以及相位频率编码梯度，知道这个之后成像就能很有规律的掌握了。

### 实验结论

1. 核磁共振信号 FID 信号是中心频率略偏离拉莫尔频率时的自由振荡衰减信号，可以用于测量拉莫尔频率，横向弛豫时间和纵向弛豫时间。射频脉冲分为软脉冲和硬脉冲两种，

成像是采用软脉冲序列，因为软脉冲具有较小的频带，具有选择激励的特点。

2.硬脉冲回波序列 $90^\circ$ 脉冲和 $180^\circ$ 脉冲的确定方式是由施加时间决定的，可以由 FID 信号幅值随施加时间第一次达到最大和最小来确定，一般是二倍关系。软脉冲回波序列 $90^\circ$ 脉冲和 $180^\circ$ 脉冲的确定方式是由脉冲幅度值 RFamp1 和 RFamp2 来确定的，一般也是二倍的关系。

3.采用自旋回波序列成像时，先使系统处于共振状态，然后需要先确定软脉冲回波序列 $90^\circ$ 脉冲和 $180^\circ$ 脉冲的脉冲幅值。成像的大小，线性度以及分辨率，灰度对比度都是参数可调的，为更有效地调整参数以得到清晰高分辨的图像，要确定在成矢面图和横断图的像时，三个梯度场参数哪个是决定层厚的，剩下两个哪个是 X、Y 方向的磁场梯度的控制者，之后就确定得到怎样的图像该怎样改参数。

4.本次实验虽然对芝麻成像，实质上还是对芝麻中的油成像，也即实验中的方法只能对液体，各项同性的物质成像，对各向异性固体由于弛豫时间太短而无法成像。

## 致谢

本次实验十分感谢指导老师俞熹的指导以及对我很多关于实验的困惑的启发性的反问，这种方式在实验中激励我在动手做实验时也不断思考，同时也十分感谢和我一起合作实验的金磊同学，很热心负责。

## 参考文献

《核磁共振成像技术实验教程》 汪红志，张学龙，武杰编著 科学出版社，2008

《近代物理实验》 第二版 戴道宣，戴乐山主编 高等教育出版社，2006.7